

تحلیل آبشستگی در پایاب جریان های فرو ریزی با مدل فیزیکی و عددی

محمد حبیبی^۱، حسین قربانی^۲

^۱ دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه شهید باهنر کرمان، مدیر طرح های مهندسی موسسه مکین، قرب سازندگی نوح (ع)

^۲ دکتر حسین قربانی، معاونت فنی موسسه مکین، قرب سازندگی نوح (ع)

چکیده

جریان های فروریزی جریان هایی هستند همواره با یک اختلاف ارتفاعی همراه هستند. آبشستگی پدیده ای دینامیکی است که در پایاب جریان های فروریزی مشاهده می شود. به دلیل پیچیدگی فرآیند آبشستگی و بررسی همزمان متغیر های مؤثر، مطالعات برای تصحیح معادلات و بررسی این پدیده ادامه دارد. این مطالعات شامل بررسی های صحرایی یا آزمایشگاهی با شرایط خاص بوده و در بعضی از آن ها از مدل های ریاضی برای استخراج نتایج استفاده شده است. در این تحقیق با استفاده از مدل فیزیکی آزمایشگاهی، به بررسی اثر جریان فروریزی قائم بر عمق تعادل آبشستگی پرداخته شده است. با تغییر پارامتر های متعددی از قبیل دانه بندی رسوبات و عمق پایاب و دبی جریان نتایج قابل توجهی پیرامون عمق تعادل آبشستگی به دست آمده است. از تحلیل ابعادی برای تعیین پارامتر های مؤثر در اندازه عمق گودال آبشستگی استفاده شده است. همچنین با استفاده از نرم افزار FLOW-3D مدل عددی آبشستگی در پایاب دراپ قائم بلند شبیه سازی شده است. نتایج حاصل از مدل عددی و مدل فیزیکی با هم مقایسه گردیده است که تطابق و همبستگی زیادی را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: آبشستگی، مدل آزمایشگاهی، دراپ قائم بلند، دل عددی، FLOW-3D

۱- مقدمه

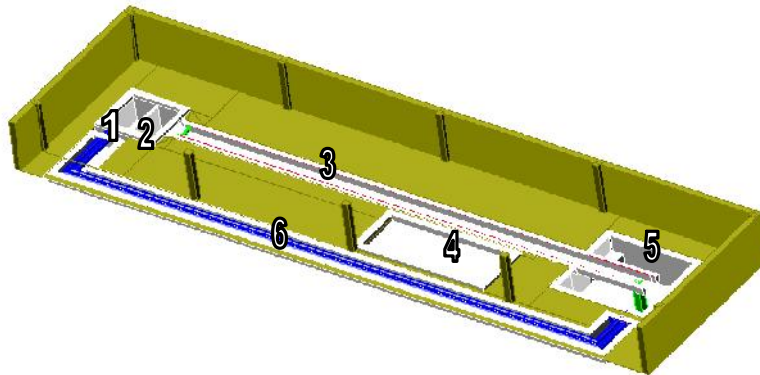
دراپ قائم از سازه های کاهنده انرژی می باشد که به عنوان شیب شکن در مسیر کانال استفاده می شود. آبشستگی پدیده ای دینامیکی است که در پایاب دراپ قائم مشاهده می شود. بستر بیشتر رودخانه ها و کانال های دریایی دائماً در معرض تغییرات می باشند. تغییرات در بستر کانال ممکن است به تغییرات در هندسه کانال منتهی شود. اگر عمق حفره های آبشستگی قابل ملاحظه باشد و به پی های پایه های سازه های دریایی برسد، ممکن است پایداری آنها را در معرض خطر قرار دهد. عوامل اثر گذار بر توسعه آبشستگی، پیچیده و بر حسب نوع سازه با هم متفاوت هستند. مطالعات گذشته نشان می دهد که عواملی چون سرعت جریان، زاویه جت جریان، دانه بندی رسوبات (d_{50})، زاویه گسیختگی رسوبات، عدد فرود جرمی در میزان عمق آبشستگی تاثیر بسزایی دارد (سلامتیان (۱۳۸۴)). معادلات حاکم بر آبشستگی توسط Cardoso (1999)، Rouse (1935)، Hanterooz (1950)، Blasidell (1980)، Cotelas (1960) مطالعه و عوامل مؤثر بر عمق گودال آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت.

در تحقیق حاضر ابتدا با ساخت مدل فیزیکی در آزمایشگاه، مطالعه آزمایشگاهی پدیده آبشستگی در پایاب جریان فروریزی انجام شد. سپس با استفاده از تحلیل ابعادی پارامتر های مؤثر در عمق گودال آبشستگی بررسی شد و در نهایت با ترکیب پارامتر ها، عمق گودال آبشستگی به صورت تابعی از عوامل تاثیر گذار بر عمق گودال آبشستگی بیان گردید. نتایج حاصل از مدل فیزیکی با نتایج محاسبه شده از مدل سازی عددی توسط نرم افزار Flow-3D مقایسه گردید که تطابق و همبستگی زیادی را نشان می دهد. با به کار گیری نرم افزار Flow-3D و مدل کردن آبشستگی رسوبات در پایاب جریان های فروریزی متوجه می شویم که با توجه به نتایج تغییر در هندسه می توان با اجزای متعدد برنامه به بهترین حالت هندسه برای دبی طراحی و نوع دانه بندی رسوب و عمق سطح پایاب دست پیدا کرد. به این ترتیب با گریز از اجبار به تن دادن به منحنی های محدود طراحی USBR و منحنی شیلدز و سایر مراجع، به سمت کاهش هزینه ها و کاهش و بهینه کردن آبشستگی و حجم انتقال یافته رسوب گام برداشت.

۲- مواد و روشها

معرفی آزمایشگاه: مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک که مجهز به کانال بتنی (فلوم) و دو حوضچه آرامش در قسمت بالادست و پایین دست می باشد، انجام شده است (شکل (۱)). در این آزمایشگاه مخزن آبی به ابعاد $۳/۹۵ \times ۳/۹۵$ متر و با عمق $۳/۲۴$ متر وجود دارد. مدار هیدرولیکی با دو لوله به

قطر های ۱۸/۵ سانتی متر با شیر فلکه قابل تنظیم جهت انتقال آب به وسیله پمپی با وزن ۳۶۷ کیلوگرم، توان ۳۷ کیلو وات و شدت جریان ۶۷ آمپر از مخزن به حوضچه ورودی منتقل می شود.



شکل (۱) - نمای سه بعدی کامل از آزمایشگاه: ۱- حوضچه آرامش ۲- حوضچه ورودی ۳- کانال ۴- مخزن ۵- حوضچه ۶- لوله های انتقال آب از مخزن به حوضچه آرامش

موتور پمپ لجن کش اصلی در داخل مخزن قرار دارد و توسط سیستم برق آزمایشگاه کنترل می شود. برای کاهش آشفته گی جریان، ابتدا آب از داخل لوله ها وارد مخزن ورودی به ابعاد $۲/۴ \times ۱/۲$ متر می شود. سپس با انتقال آرام، جریان از لوله های تحتانی وارد حوضچه آرامش به ابعاد $۲/۴۴ \times ۱/۲۶$ متر شده و پس از آن وارد کانال آزمایشگاه می شود. این کانال از بتن مسلح با طول $۲۱/۸۵$ متر، عرض $۰/۷۷$ متر و ارتفاع $۰/۶$ متر ساخته شده است. پس از وارد شدن جریان به داخل کانال، مجدداً به مخزن آزمایشگاه هدایت می شود. شکل (۲) (۲) جریان ورودی در قسمت بالادست جریان را نشان داده است. همانطور که در شکل دیده می شود، یک سرریز دوزنقه ای در قسمت بالادست و قبل از سرریز دراپ قرار گرفته است. از این سرریز برای اندازه گیری دبی جریان استفاده شده است. عرض سرریز جریان در دراپ ۴۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. قسمت بالا دست بستر جریان با شن درشت پوشانده شده است. این عمل به علت ایجاد بستر طبیعی برای جریان قسمت بالا دست اعمال شده است.



شکل (۲) - نمای کلی دراپ قائم در قسمت بالا دست

جهت بررسی وضعیت بستر کانال در حین انجام آزمایش و پس از هر مرحله آزمایش، عمق آبستگي رسوب با استفاده از دستگاه عمق سنج مدل KENEK WH-406 با دقت $۰/۵$ میلیمتر اندازه گیری می شود. دستگاه از دو قسمت تشکیل شده است، قسمت اول شامل بدنه اصلی دستگاه بوده که تنظیمات بر روی آن صورت می پذیرد. در قسمت اصلی دستگاه صفحه ما نیتر جهت نشان دادن مقادیر اندازه گیری شده توسط سنسور اندازه گیری دستگاه وجود دارد. مقادیر اندازه گیری شده (عمق گودال آبستگي) از مکان خاصی مانند عمق کف کانال کسر میگردد تا ارتفاع رسوب به دست آید. قسمت دوم دستگاه نیز شامل یک سنسور اندازه گیری است که از یک بدنه ثابت و یک لوله داخلی متحرک تشکیل شده است.

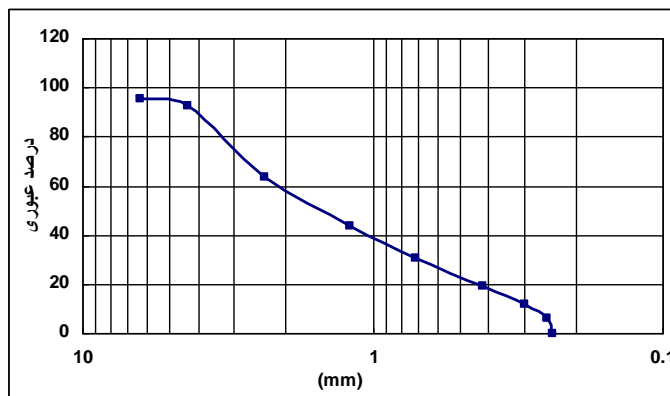
۱-۲- شرح آزمایش

آزمایشات دانه بندی رسوبات در گروه ماسه، صورت گرفت که پارامتر های موثر در دانه بندی خاک مانند، C_u ، C_c ، d_{10} ، d_{30} ، d_{50} ، d_{60} ، d_{90} در این آزمایش اندازه گیری شد که نتایج در جدول (۱) نشان داده شده است. C_u ضریب یکنواختی و C_c ضریب دانه بندی است. d_p قطری است که ۳ درصد ذرات از آن ریز تر می باشد.

جدول (۱)- دانه بندی رسوبات بکار رفته و مشخصات مکانیکی آنها. شماره اندیس درصد عبوری ذرات از الک و C_u ضریب یکنواختی، C_c ضریب دانه بندی

شماره گروه	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	D_{90} (mm)	C_u (بی بعد)	C_c (بی بعد)
۱ (ماسه)	۰/۲۸	۰/۷۱	۱/۳	۲/۳۵	۴/۳۵	۸/۳۹	۰/۷۷

شکل (۶) نمودار نیمه لگاریتمی درصد عبوری رسوب با قطر متوسط ۱/۳ میلی متر مربوط به رسوب از جنس ماسه را نشان می دهد.

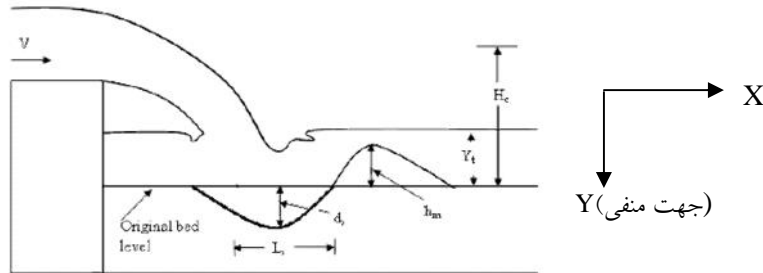


شکل (۶)- نمودار دانه بندی ماسه با قطر متوسط ۱/۳ میلی متر

آزمایشات، ابتدا بر روی ماسه با قطر متوسط $d_{50} = 1/3$ (mm) و ضریب هبستگی $\dagger_g = 3/29$ صورت گرفته است. اگر $\dagger_g \geq 2$ باشد رسوبات غیر یکنواخت می باشد. در نتیجه رسوب ماسه که در این آزمایش از آن استفاده شده است غیر یکنواخت می باشد ($3/29 \geq 2$). بعد از آزمایشات دانه بندی خاک، بستر رسوبی در قسمت پایین دست آماده می شود (مطابق شکل (۷)). Schoklitsch (1932) برای محاسبه عمق آبشستگی معادله زیر با توجه به شکل (۷) پیشنهاد نمود:

$$d_{se} + h_t = C_s \frac{q^{0.57} H^{0.2}}{d_{90}^{0.32}} \quad (1)$$

C_s ضریب ابعادی، h_f عمق پایاب (m)، H فاصله بین بالادست و پایین دست (m)، q دبی در واحد عرض ($\frac{m^2}{s}$)، d_{se} عمق تعادل آبشستگی (m)، می باشد. جریان خارج شده از دراپ قائم بلند دارای انرژی زیادی می باشد، لذا با آگاهی کامل از روش های اتلاف انرژی، میزان تاثیر آبشستگی بر سازه ها و همچنین آگاهی از محل وقوع آبشستگی، می بایست از ایجاد خرابی و مشکلات ناشی از آبشستگی جلوگیری گردد.



شکل (۷) - نمای دراپ قائم بلند، پارامتر های مهم آن h_f ، عمق پایاب (m)، y_c ، عمق بحرانی (m)، d_{se} ، عمق گودال آبشستگی (m)

عمق پایاب (m)، h_m ارتفاع تپه (m)، عمق گودال آبشستگی (m) و L_s طول گودال آبشستگی (m) و v سرعت در قسمت بالا دست می باشد. در تقسیم بندی دراپ ها، اگر نسبت ارتفاع دراپ به عمق بحرانی در بالا دست بزرگتر از یک باشد ($\frac{H}{y_c} > 1$)، دراپ از نوع دراپ قائم بلند می باشد. دبی انتخابی برای شروع آزمایش ۷/۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است که این مقدار، حداقل دبی می باشد که با در نظر گرفتن قطر متوسط (۱/۳ میلی متر) باعث آغاز آبشستگی در بستر رسوبی می گردد. آزمایشات در ۴ سری انجام می شود: ۱- دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۴۰ سانتی متر، ۲- دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۵۰ سانتی متر، ۳- دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۴۰ سانتی متر، ۴- دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۵۰ سانتی متر.

ابتدا، کانال در قسمت پایین دست آبیگری می شود (شکل (۲)). پس از آنکه ارتفاع آب بر بستر رسوبی با توجه به دو عمق پایاب ۴۰ و ۵۰ سانتی متر تثبیت شد، با باز نمودن شیر فلکه آب در قسمت بالا دست، آب از روی سرریز دوزنقه ای جاری شده و به لبه سرریز دراپ می رسد. در این زمان جهت فروریزی به سمت پایین دست سقوط کرده و آبشستگی آغاز می شود (شکل (۳)). در هر چهار سری آزمایش، اندازه گیری پروفیل آبشستگی توسط دستگاه عمق سنج در پنج زمان ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ دقیقه انجام شد. عمق تعادل آبشستگی بعد از گذشت ۱۲۰ دقیقه از شروع آزمایش روی داد. در شکل ۸ (الف) و ۸ (ب) نمایی از گودال و تپه بر اثر آبشستگی در انتهای آزمایش نشان داده شده است.



شکل (۸) - نمای گودال و تپه ایجاد شده بر اثر پدیده آبشستگی در انتهای آزمایش، نقطه A نشان دهنده گودال و نقطه B نشان دهنده تپه ایجاد شده می باشد.

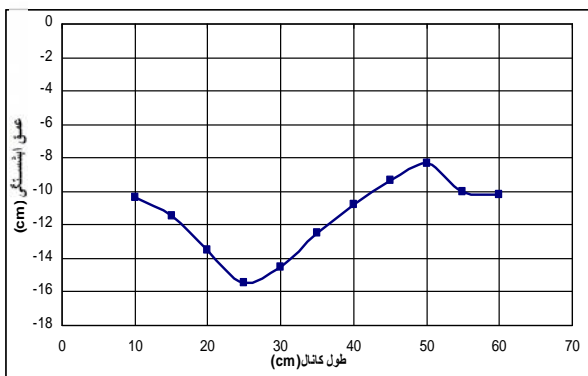
۲-۲- نتایج و بحث

با توجه به چهار مرحله ای که در قسمت شرح آزمایش به آن اشاره شد، نمودارها و جداول مربوط به آنها ارائه شده است، d_{se} ، عمق گودال آبستگي می باشد.

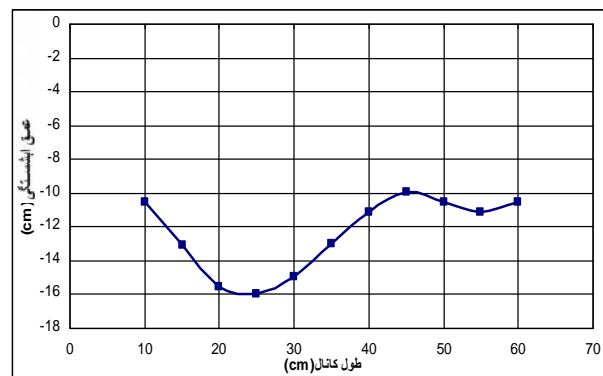
- ۱- دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۴۰ سانتی متر.
- ۲- دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۵۰ سانتی متر
- ۳- دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۴۰ سانتی متر
- ۴- دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۴۰ سانتی متر

جدول (۲) - تغییرات عمق آبستگي در طول کانال $d(50)=1/3(mm)$

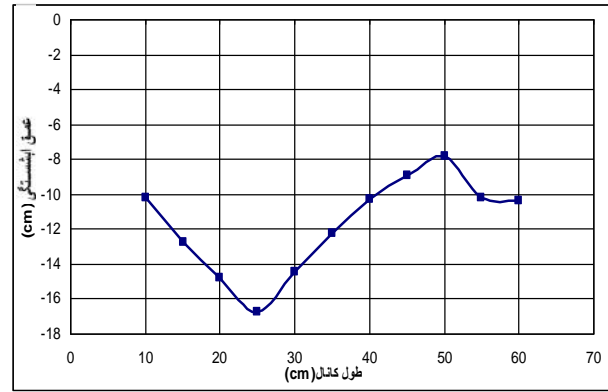
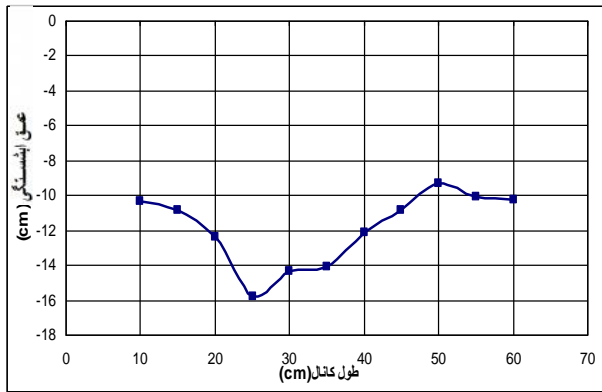
(x)(m) طول کانال	d_{se1} (cm)	d_{se2} (cm)	d_{se3} (cm)	d_{se4} (cm)
۱۰	-۱۰/۵	-۱۰/۴	-۱۰/۲	-۱۰/۳
۱۵	-۱۳/۱	-۱۱/۵	-۱۲/۷۷	-۱۰/۸۵
۲۰	-۱۵/۵۶	-۱۳/۵	-۱۴/۸	-۱۲/۴
۲۵	-۱۶	-۱۵/۴۵	-۱۶/۷۵	-۱۵/۸
۳۰	-۱۴/۹۵	-۱۴/۵	-۱۴/۴	-۱۴/۳
۳۵	-۱۳/۰۲	-۱۲/۴۴	-۱۲/۲	-۱۴/۱
۴۰	-۱۱/۱	-۱۰/۷۵	-۱۰/۲۶	-۱۲/۱
۴۵	-۹/۹	-۹/۳	-۸/۹۲	-۱۲/۸
۵۰	-۱۰/۵۲	-۸/۲۸	-۷/۷۷	-۹/۳
۵۵	-۱۱/۱۲	-۱۰	-۱۰/۲	-۱۰/۱
۶۰	-۱۰/۵۱	-۱۰/۲	-۱۰/۳۷	-۱۰/۲۵



شکل (۱۰) - تغییرات عمق آبستگي در طول کانال $d_{50}=1/3(mm)$ در حالتی که عمق پایاب ۵۰ (cm) و دبی ۷/۵ (Lit/s) می باشد.



شکل (۹) - تغییرات عمق آبستگي در طول کانال $d_{50}=1/3(mm)$ و ۴۰ (cm) عمق پایاب و دبی ۷/۵ (Lit/s) می باشد.



شکل (۱۲) - تغییرات عمق آبشستگی در طول کانال $d_{50}=1/3(mm)$ در حالی که عمق پایاب $50(cm)$ و دبی $8/7 (Lit/s)$ می باشد.

شکل (۱۱) - تغییرات عمق آبشستگی در طول کانال $d_{50}=1/3(mm)$ در حالی که عمق پایاب $40(cm)$ و دبی $8/7 (Lit/s)$ می باشد.

در شکل های (۹ تا ۱۲) نمودار های مربوط به پروفیل آبشستگی در طول کانال در دقیقه ۱۲۰ رسم شده است. همانطور که در شکل ها مشاهده می شود با افزایش دبی در حالی که عمق پایاب ثابت است عمق ماکزیمم گودال آبشستگی افزایش می یابد. همچنین با افزایش عمق پایاب در حالی که دبی جریان ثابت است، عمق ماکزیمم گودال آبشستگی کاهش می یابد.

تحلیل ابعادی پارامتر های موثر بر عمق گودال آبشستگی (d_{se})، در زیر دراپ قائم به صورت زیر می تواند ارائه شود:

$$d_{se} = f_1(U_0, y_0, h_t, \dots, \dots, s, g, \epsilon, d_{50}) \quad (2)$$

که در این فرمول، h_t عمق پایاب، ... چگالی آب، s ... چگالی رسوب، g شتاب ثقل، ϵ ویسکوزیته کنیما تیک ($\epsilon = 10^{-6} m^2 / s$) می باشد. با ترکیب پارامتر های ...، s و g پارامتر $\Delta \times g$ معرفی میشود، Dey and Raikar (2005). $\Delta = s - 1$ ، s چگالی نسبی رسوب می باشد که برابر با \dots / \dots می باشد. همچنین از ویسکوزیته کنیما تیک (ϵ) در جریان کاملاً آشفته بر روی بستر زبر صرف نظر شده است. به منظور آسان کردن تحلیل ابعادی می توان از روش های باکینگهام، روش رایلی، روش ماتریس حاصل ضرب های بدون بعد استفاده نمود که در این مطالعه از روش باکینگهام استفاده شده است.

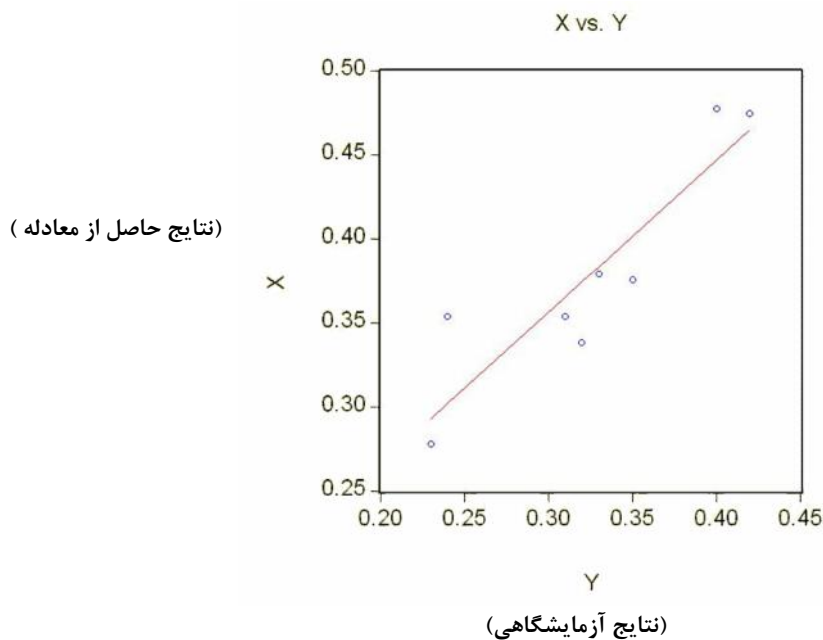
در این مطالعات با در نظر گرفتن پارامتر های تکراری U_0 ، y_0 و مرتب سازی پارامتر های بدون بعد خواهیم داشت:

$$\tilde{d}_{se} = f_2(Fr_0, \tilde{d}, \tilde{h}) \quad (3)$$

که $\tilde{d}_{se} = d_{se} / y_0$ ، $Fr_0 = U_0 / (\Delta g d_{50})^{0.5}$ ، که عدد فرود جرمی، $\tilde{d} = d_{50} / y_0$ و $\tilde{h} = h_t / y_0$ می باشد. با استفاده از داده های آزمایشگاهی و رگرسیون گیری معادله بدون بعدی برای عمق گودال آبشستگی به دست آمد:

$$\frac{d_{se}}{y_0} = 56.82 \cdot (Fr_0)^{1.19} \cdot \left(\frac{h_t}{y_0}\right)^{-0.21} \cdot \left(\frac{d_{50}}{y_0}\right)^{-0.47} \quad (4)$$

در شکل (۱۳) مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و داده های به دست آمده از معادله (۴) صورت گرفته است.



شکل (۱۳) - مقایسه نتایج آزمایشگاهی با داده های حاصل از معادله (۳)

۳- تحلیل عددی

Flow-3D یک نرم افزار قوی در زمینه CFD می باشد. برای مسائل یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی طراحی شده است. James (2003). زیرا برنامه بر روی قوانین بنیادی جرم، مومنتوم و بقای انرژی پایه گذاری شده است، تا این موارد برای مراحل مختلف جریان در هر زمینه ای به کار برده شوند. یکی از قابلیت های عمده برنامه Flow-3D برای آنالیز های هیدرولیکی توانایی مدل کردن جریان های با سطح آزاد می باشد. حد فاصل بین گاز و مایع همان سطح آزاد است. در Flow-3D سطح آزاد با تکنیک Vof (Volume of fluid) مدل می شود که توسط هیبرت و نیچدز (Hirt & Nichds, 1981) گزارش شد. روش Vof شامل سه جزء است: ۱- نمایش موقعیت سطح، ۲- شبکه بندی، ۳- شرایط مرزی سطح.

۳-۱- مدل آبشستگی رسوب

این مدل فرسایش، ته نشینی، پهن رفت رسوبات را پیش بینی می کند. مدل آبشستگی رسوب می تواند برای هر جریانی به کار برده شود. ترکیب ته نشینی مدل، ذرات رسوب را به صورت کروی و سرعت آنها را کم فرض می کند. ضریب ته نشینی به صورت زیر محاسبه میشود:

SCRDLA: میانگین سرعت ذرات، RHOF: چگالی سیال، ~: لزجت دینامیکی سیال. ترکیب لیفت آبشستگی یک مدل تجربی است که بر روی مدل های انتقال رسوب بار بستر پایه گذاری شده است. سرعت لیفت از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$D_f = \frac{SCRDLA^2 \cdot RHOF}{18 \sim} \quad (5)$$

$$liftvelocity = SCRALP \sqrt{\frac{\ddagger - \ddagger_c}{\dots}} \quad (6)$$

SCRALP: پارامتر تجربی که نسبت آبشستگی ذرات به کار برده شده است، SCRRHO: چگالی ذرات رسوب ($\frac{g}{cm^3}$).

...: چگالی سیال درشت، \ddagger : تنش برشی

(۷)

$$\ddagger_c = SCRCRT .SCRDLA .g (SCRRHO - RHOF)$$

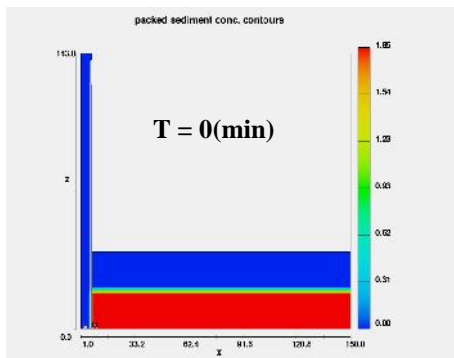
$$\sim = \sim_0 \left(1 - \frac{Solidfraction}{SCRFCR}\right)^{-1.55}$$

g: شتاب ثقل، SCRCRT: پارامتر بحرانی شیلدز، \ddagger_c : تنش برشی بحرانی

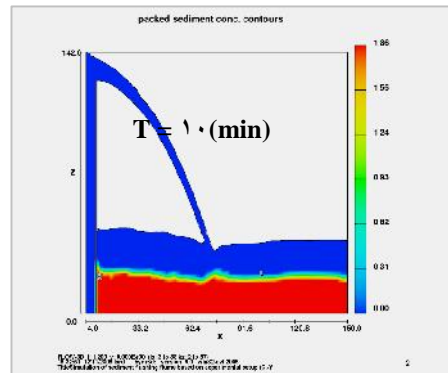
(۸)

\sim_0 : لزجت دینامیکی سیال.

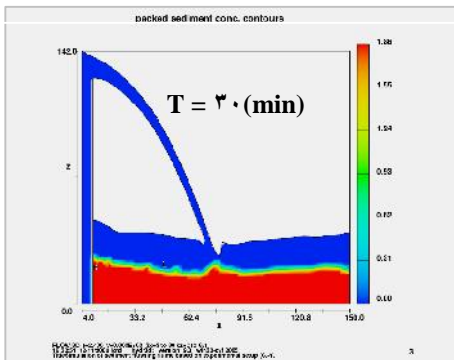
بعد از مدل کردن پدیده آبستگي در نرم افزار، برنامه اجرا می شود (Runsolver). با توجه به اینکه زمان پایان یافتن آزمایش، همان زمان رسیدن عمق گودال آبستگي به تعادل می باشد. این زمان (Finish time) برای مدل حاضر ۱۲۰ دقیقه در نظر گرفته می شود. شکل (۱۳) مراحل شبیه سازی آبستگي را در پایاب دراپ قائم بلند نشان می دهد. در زمان صفر هنوز جت جریان فرو ریزشی به سمت پایین دست جریان پیدا نکرده است. پس از گذشت ۱۰ دقیقه از شروع آزمایش، پروفیل رسوب تغییر شکل پیدا کرده و نشانه های آبستگي در آن نمایان شده است. در زمان های ۳۰، ۶۰، ۹۰، گسترش ابعاد حفره آبستگي ادامه پیدا می کند. در زمان ۱۲۰ دقیقه مراحل نهایی آبستگي و به تعادل رسیدن عمق آبستگي نشان داده شده است.



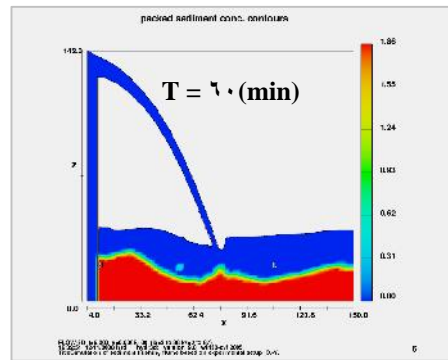
شکل (۱۳-الف) - مرحله اول (T=0min)، $d_{50} = 1/3$ (mm)، دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۴۰ سانتی متر می باشد.



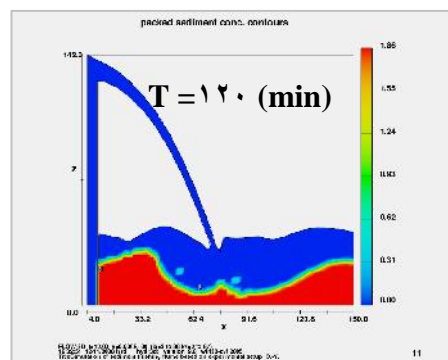
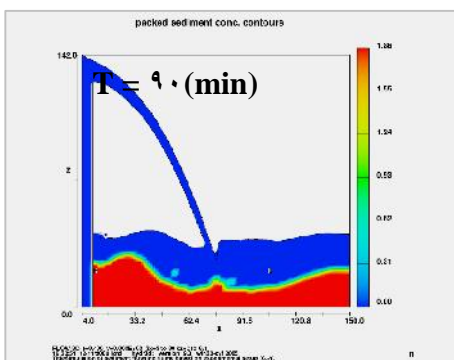
شکل (۱۳-ب) - مرحله دوم (T=10min)، $d_{50} = 1/3$ mm، دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۴۰ سانتی متر می باشد.



شکل (۱۳-ج) - مرحله سوم (T=30min)، $d_{50} = 1/3$ mm، دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۴۰ سانتی متر می باشد.



شکل (۱۳-د) - مرحله چهارم (T=60min)، $d_{50} = 1/3$ mm، دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۴۰ سانتی متر می باشد.



شکل (۱۳-ز)- مرحله ششم ($T=120\text{min}$) ، $d_{50} = 1/3 \text{ mm}$ ،

دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۴۰ سانتی متر می باشد.

شکل (۱۳-ه)- مرحله پنجم ($T=90\text{min}$) ، $d_{50} = 1/3 \text{ mm}$ ،

دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۴۰ سانتی متر می باشد.

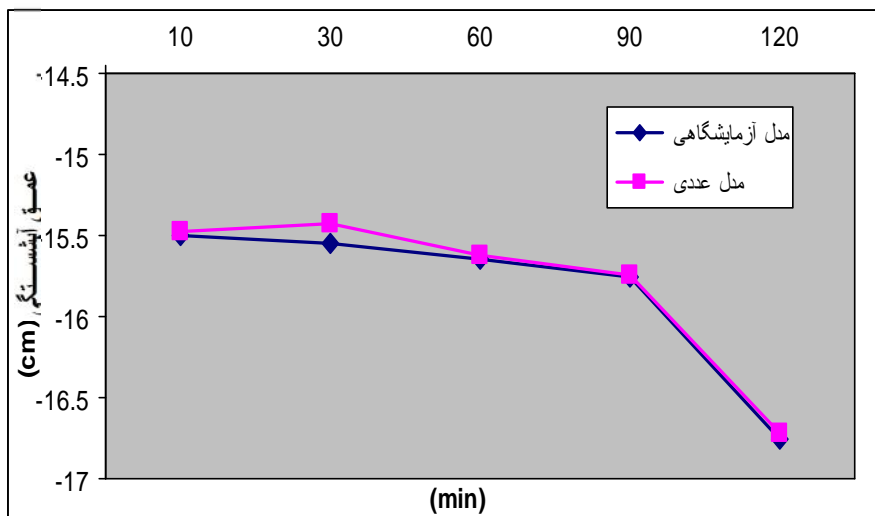
۴- بحث و مقایسه

پس از پایان یافتن آزمایشات و شبیه سازی عددی، مقایسه نتایج صورت گرفته است. در جدول (۶) با استفاده از خروجی داده ها در قسمت نتایج که در نرم افزار Flow-3d موجود می باشد، اطلاعات خروجی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.

جدول (۶)- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی عمق آبستگي در طول زمان، $d_{50} = 1/3 \text{ mm}$ ،

دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۴۰ سانتی متر می باشد. $d_{50}=1/3(\text{mm})$

d_{se} (cm)	۱۰(min)	۳۰(min)	۶۰(min)	۹۰(min)	۱۲۰(min)
Numerical (مدل عددی)	-۱۵/۴۷۵	-۱۵/۵۲۴	-۱۵/۶۲۵	-۱۵/۷۲۴	-۱۶/۷۲۴
Experimental (مدل آزمایشگاهی)	-۱۵/۵	-۱۵/۵۵	-۱۵/۶۵	-۱۵/۷۵	-۱۶/۷۵



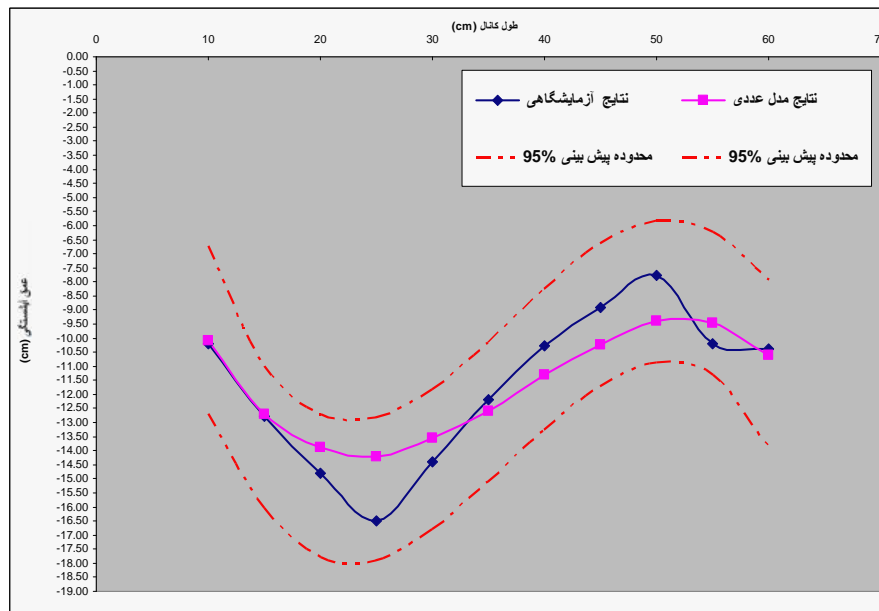
شکل (۱۴)- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی، $d_{50}=1/3 \text{ mm}$ ، دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب

۴۰ سانتی متر می باشد.

جدول (۷) - مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی عمق آبشستگی در طول کانال، دبی جریان ۸/۷ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۴۰ سانتی متر می باشد.

d (cm)	پروفیل آبشستگی در طول کانال از x=0 cm تا x=150cm										
	Num	-۱۰/۱	-۱۲/۷	-۱۳/۸۹	-۱۴/۲	-۱۳/۵۶	-۱۲/۶۱	-۱۱/۳	-۱۰/۲۴	-۹/۴	-۹/۴۵
EXP	-۱۰/۲	-۱۲/۶	-۱۴/۸	-۱۶/۷	-۱۴/۴	-۱۲/۴	-۱۰/۴	-۸/۹۲	-۷/۷	-۱۰/۲	-۱۰/۳

d_{se} عمق گودال آبشستگی می باشد که در زمان های در نظر گرفته در جدول نشان داده شده است. d عمق های مختلفی است که در طول ایجاد شدن گودال آبشستگی در طول پروفیل ثبت شده اند. با توجه به مقایسه اعماق گودال آبشستگی در زمان های مشخص در جدول (۶) و مقایسه پروفیل طولی در دو حالت بررسی عددی و آزمایشگاهی در جدول (۷) در شکل های (۱۴) و (۱۵) نمودار های مقایسه ای نشان داده شده است.



شکل (۱۵) - مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی همراه با تعریف محدوده پیش بینی ۹۵٪ برای مشاهدات جدید (For new observation)

همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده می شود، محدوده پیش بینی (Prediction bounds) برای نتایج آزمایشگاهی ۹۵ درصد تعریف شده است. با رسم منحنی به دست آمده از مدل عددی و مقایسه آن با منحنی حاصل از مدل آزمایشگاهی، مشاهده شد که نتایج شبیه سازی عددی در محدوده پیش بینی (Prediction bounds) نتایج آزمایشگاهی قرار دارد و از همبستگی خوبی برخوردار است.

نتایج و پیشنهادات:

دراپ از سازه های مستهلک کننده انرژی می باشد که در کانال های انتقال آب از آن استفاده می شود. دراپ قائم یکی از انواع دراپ ها می باشد. در طراحی حوضچه های استغراق و دراپ ها که برای رسیدن به عمق تعادل آبستگي زمان خیلی طولانی نیاز دارد، احتمال پیش بینی بیش از مقدار واقعی عمق تعادل آبستگي، زیاد است. با محاسبه توسعه زمانی عمق آبستگي به مقدار کمتری برای حداکثر عمق آبستگي می رسیم، یعنی در زمان های مشخص شده ای از ابتدای آزمایش اندازه گیری عمق آبستگي صورت گیرد، که این سبب کاهش هزینه های ساخت می شود. درصد بالایی از آبستگي ایجاد شده، در دقایق اولیه آزمایش به وقوع می پیوندد. با افزایش زمان برای دبی های مختلف افزایش عمق حفره آبستگي را خواهیم داشت. با افزایش عمق پایاب، عمق حفره آبستگي کاهش می یابد، با کاهش عمق پایاب طول حفره آبستگي کاهش می یابد. با افزایش قطر متوسط، ابعاد حفره آبستگي کاهش می یابد. برای تحلیل بهتر پدیده آبستگي می توان با مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نرم افزار هایی که قابلیت مدل کردن پدیده آبستگي را دارند به نتایج بهتری دست یافت. با به کار گیری مدل عددی تحت نرم افزار Flow-3D و مدل فیزیکی در آزمایشگاه مقایسه کاملی بین نتایج حاصل از هر دو مدل صورت گرفت، که همبستگی و تطابق زیادی را نشان می دهد.

۵- مراجع

- ۱- شفای بجستان، م. ۱۳۸۳. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
- ۲- تاج کریمی، درنا، تحلیل آبستگي بستر ناشی از جت های ریزی و کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در آن، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی مهندسی، ۱۳۷۷
- ۳- ابریشمی، جلیل. حسینی، محمود. "هیدرولیک کانالهای روباز". انتشارات دانشگاه امام رضا، ۱۳۸۰.
- ۴- آذر فرادنبه، اردشیر. "اثر دانه بندی مصالح بر میزان آبستگي پایین دست سرریزهای ریزی آزاد"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۷۷.

5-Bakhmeteff, B. A.(1932). Hydraulics of open Channels, McGraw-Hill, New York.

6-Subhasish Dey and Rajkumar V.Raikar, "Scour below high vertical drop" Journal of Hydraulic engineering, Vol.133, No. 5, May 1, 2007. ASCE

7- James Brethour. (2003). "Modeling Sediment Scour", Flow Science, Inc. Santa Fe, NM 87505